الفصل السابع

وحدات قياس الجرعات الإشعاعية
Units of radiation dosimetery

-مقدمة – كثافة تدفق الإشعاعات – التعرض – الجرعة الإشعاعية – التكافؤ بين الرينتجن والراد – التأثير البيولوجي داخل جسم الإنسان – معدل الجرعة – أسئلة ومسائل

7 –1 مقدمة

عند سقوط كمية من الإشعاعات الضوئية أو الحرارية على مادة ما تنتقل طاقة هذه الإشعاعات إلى المادة فتزداد درجة حرارتها. أما بالنسبة للكائنات الحية (بما فيها الإنسان) فلا ترتفع درجة حرارتها نظرا لقيام جسم الكائن الحي بفقد هذه الطاقة الممتصة في تبخير الماء من الجسم، فتبقى درجة حرارته ثابتة. ومع ذلك، يحس الإنسان بالإشعاعات الضوئية والحرارية، وبذلك يستطيع تفاديها بالابتعاد عن مصادرها. أما بالنسبة للإشعاعات المؤينة فلا تحس بها الكائنات الحية على الإطلاق، وذلك نظرا لقدرتها العالية على اختراق جسم الكائن الحي وفقدها طاقتها عن طريق تأيين جزيئات الماء الموجودة في الجسم. فعند تعرض جسم الكائن لكمية من الإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما أو الجسيمات النووية فإنه لا يحس بها في حينه، مهما زادت كميتها.

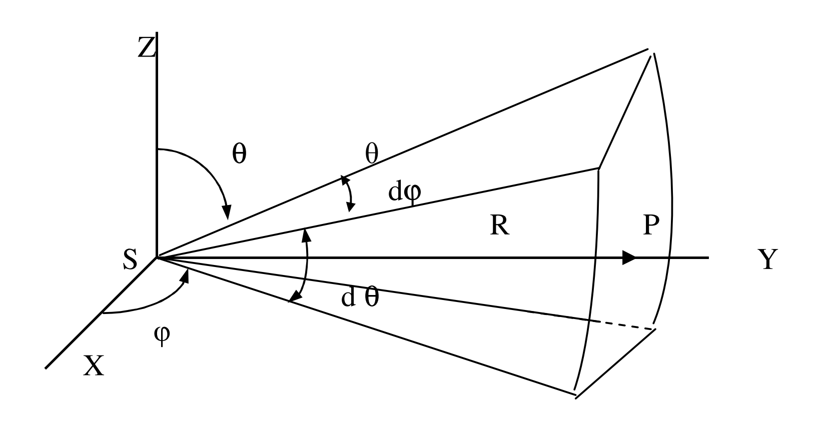
لذلك، فإنه لوقاية الكائنات الحية عموما – بما فيها الإنسان – من التعرض للإشعاعات المؤينة يجب الكشف عن وجودها وتحديد كمياتها ومستوياتها الإشعاعية في جميع الأماكن التي يمكن أن توجد فيها. ويختص هذا الفصل بالتعرف على الوحدات المستخدمة لقياس كميات الإشعاعات (المستويات الإشعاعية) والجرعات الإشعاعية.

2−7 كثافة تدفق الإشعاعات (أو معدل سيولة الإشعاعات)

Radiation flux density (or fluence rate)

كثافة التدفق للجسيمات النووية أو الإشعاعات عند نقطة ما هو عبارة عن عدد الجسيمات المارة خلال مساحة قدرها 1 سم^2 (وحدة المساحات) في الثانية عند هذه النقطة. ويمكن حساب كثافة التدفق للمصادر المشعة ذات الأشكال المختلفة. فإذا كان حجم المصدر صغيرا بالنسبة للمسافة حتى النقطة المطلوب تحديد كثافة التدفق عندها فإنه يمكن اعتبار هذا المصدر نقطيا (أي علي شكل نقطة مادية صغيرة). ويوضح شكل (7−1) كيفية حساب كثافة التدفق ϕ الناتج عن مصدر نقطي نشاطه الإشعاعي S عند نقطة ما P تبعد مسافة R عن مركز المصدر S ، وبحيث تكون هذه المسافة R أكبر بكثير من نصف قطر المصدر. فكثافة التدفق عندما يوضع المصدر في مركز كرة يمر سطحها بالنقطة P هي عبارة عن:

$$\phi = S / A \qquad (7\text{-}1)$$



شكل (7−1)
كيفية حساب كثافة التدفق عند نقطة P من مصدر نقطي

حيث S شدة المصدر (بوحدة جسيم/ثانية)، A مساحة سطح الكرة التي يكون المصدر في مركزها ونصف قطرها R. وحيث إن مساحة سـطح الكرة التي نصف قطرها R هي:

$$A = 4\pi R^2$$

تكون كثافة التدفق ϕΦ(بوحدة جسيم/سم^2.ثانية) هي:

$$\phi = S / 4\pi R^2 \qquad (7\text{-}2)$$

أي أن كثافة التدفق ϕ عند نقطة معينة تتناسب تناسبا طرديا مـع شدة المصدر S وعكسيا مع مربع المسافة R حتى النقطة المعينة. وتجدر الإشارة إلى أنه وفقا للوحدات المعيارية العالمية الجديدة (SI) يطلق الآن على كثافة تدفق الجسيمات مصطلح جديد هو "معدل سيولة الجسيمات أو الفوتونات".

وتعرف هذه العلاقة الأخيرة بقانون التربيع العكسي لمعدل سيولة الجسيمات (أو لكثافة التدفق) من مصدر نقطي.

ويمكن إيجاد معدل سيولة الجسيمات الناتجة عن المصـادر ذات الأشكال المختلفة كالمصادر الممتدة طوليا أو مساحيا أو حجما.

وفي كثير من الأحيان يصدر المصـدر أنواعـا مختلفـة مـن الإشعاعات، أو يصدر إشعاعات من نفس النوع ولكن بطاقات مختلفـة. عندئذ، يجب تعيين معدل سيولة (كثافة تدفق) الجسيمات أو الإشـعاعات للأنواع المختلفة. وأحيانا يستخدم مصطلح آخر يعـرف بكثافـة تـدفق الطاقة (energy flux density). وتعرف كثافة تدفق الطاقة على أنها كمية الطاقة المارة خلال وحدة المساحات في الثانية الواحـدة عنـد النقطـة المعينة. ولتحديد كثافة تدفق الطاقة، فإنه يجـب معرفـة كثافـة تـدفق الإشعاعات وطاقاتها. فإذا كان لهذه الإشعاعات نفس مقدار الطاقـة E تكون كثافة تدفق الطاقة Φ هي عبارة عن:

$$\Phi = E\,\phi \qquad (7\text{-}3)$$

أما عند اختلاف طاقة الجسيمات فإنه يمكن تحديد كثافـة تـدفق الطاقة كالآتي:

$$\Phi = \int_{0}^{Emax} \phi \, dE \qquad (7\text{-}4)$$

وتجدر الإشارة إلى أن المصطلح المعياري العالمي الجديد لكثافة تدفق الطاقة أصبح هو معدل سيولة الطاقة (Energy fluence rate) .

3-7 التعرض The exposure

يستخدم مصطلح التعرض ليدل على مفهومين، أحدهما عام والآخر فيزيائي. وبالمفهوم العام، يستخدم مصطلح التعرض للدلالة على التعرض للإشعاعات المؤينة. وبهذا المفهوم قد يكون التعرض خارجيا (external exposure)، أي ناتجا عن مصدر مشع موجود خارج الجسم، وقد يكون داخليا (internal)، أي ناتجا عن ادخال مادة مشعة داخل الجسم. وبهذا المفهوم أيضا، قد يوصف التعرض بالمهني (occupational) أي تعرض الأشخاص الذين يمتهنون العمل بالإشعاعات المؤينة، أو بالطبي (medical exposure) ، أي تعرض المرضى بهدف تشخيص أمراضهم أو علاجها. كذلك، قد يوصف التعرض بالعادي (normal) وهو التعرض الذي يحدث في ظروف التشغيل العادية للمصادر والمواد المشعة، كما يمكن أن يوصف بالكامن (potential exposure) أي التعرض الذي قد ينتج عن ظروف حوادث إشعاعية. وفضلا عن ذلك، قد يوصف التعرض بالحاد (acute exposure) وهو ذلك التعرض الذي يودع كمية هائلة من الإشعاعات في المتعرض خلال فترة زمنية قصيرة (دقائق أو ساعات أو حتى أيام قليلة)، وقد يوصف بالمزمن (chronic exposure) وهو ذلك التعرض الذي يودع كميات قليلة من الإشعاع ولكن خلال فترة زمنية طويلة (تمتد لعدة سنوات مثل تعرض العاملين المهنيين).

أما المفهوم الفيزيائي للتعرض فيقصد به كمية الإشعاعات المؤينة التي يتكبدها عضو أو نسيج من أعضاء أو أنسجة الكائن الحي، أو يتعرض لها جسمه ككل. فعند تعرض الخلايا الحية للإشعاعات المؤينة تمتص هذه الخلايا جزءا من الطاقة التي تحملها هذه الإشعاعات، وربما الطاقة كلها. وهذه الطاقة الممتصة داخل الخلايا هي التي تؤدي إلى تلفها. وتجدر الإشارة إلى أن التعريف التاريخي الدقيق للتعرض،

بالمفهوم الفيزيائي، هو تعرض الهـواء الجـاف للأشـعة السـينية أو إشعاعات جاما منخفضة الطاقة (حتى 3 ميغا إلكتـرون فولـت) عنـد الظروف المعيارية للضغط الجوي ودرجة الحرارة.

وأنسب طريقة لقياس كمية الإشعاعات التي يتعرض لهـا جسـم الكائن الحي (أي التعرض) هي قياس الشحنة الكهربية الناتجة عن تأين الهواء في هذه الظروف. لذلك، فقد اتفق على اعتبار التعرض هو عبارة عن كمية التأين الناتجة عن الإشعاعات السينية أو إشعاعات جامـا فـي وحدة الحجوم (أي 1 سم ^{3}) من الهواء الجاف عند الظروف الجويـة المعيارية (أي عند درجة حرارة صفر مْ وعند ضـغط مقـداره 760 ملليمتر زئبق).

وحدة قياس التعرض – الرينتجن **Roentgen (R)**

يقاس التعرض بوحدة تعـرف بـالرينتجن (Roentgen) تخليـدا لذكرى العالم الذي اكتشف الأشعة السينية. وتستخدم هذه الوحدة لقيـاس مقدار الطاقة الإشعاعية التي تنتقل من الكمية المحددة من الأشعة السينية أو إشعاعات جاما ذات الطاقة المنخفضة.

وقد تم تعريف الرينتجن (R) ، في أول الأمر على أنـه كميـة الإشعاعات السينية (أي التعرض) التي تؤدي إلى إنتاج شحنة كهربائية (سالبة أو موجبة) مقدارها وحدة واحدة كهروستاتيكية (1 esu) في اسم^{3} من الهواء الجاف عند الظروف الجوية المعيارية، أي أن:

$$1\ R = 1\ esu / cm^3 air \qquad (7\text{-}5)$$

وحيث إن كافة الهواء عند الظروف المعيارية هـي 0.001293 جم/سم^{3} ، وأن الوحدة الكهروسـتاتيكية مرتبطـة بوحـدة الكولـوم C بالعلاقة:

$$1\ esu = 1 / (3 \times 10^9)\ Coulomb \qquad (7\text{-}6)$$

فقد أصبح تعريف الرينتجن R طبقا لنظام الوحـــدات المعياريـــة الدولية (SI) هو:

$$1\ R = 1x\,(1/3x10^{9}) \div 0.001293$$
$$= 2.58\ x\ 10^{-7}\quad \text{Coulomb/gram}$$

أي أن:

$$1\ R = 2.58\ X\ 10^{-4}\quad \text{Coulomb/kg} \quad (7\text{-}7)$$

أي أن الرينتجن هو التعرض الذي يـؤدي إلـــى إنتـــاج شـــحنة كهربائية موجبة أو سالبة مقدارها $2.58\ x\ 10^{-4}$ كولوم في كل ا كجـــم من الهواء الجاف عند الظروف الجوية المعياريـــة. وحيـــث أن شـــحنة الإلكترون أو الأيون تساوي $1.6\ x\ 10^{-19}$ كولوم فإن هـــذا يعنـــي أن الرينتجن الواحد ينتج عددا من الأزواج الإلكترونية الأيونية n مقداره:

$$n = 2.58\ x\ 10^{-4} / 1.6\ x\ 10^{-19}$$
$$= 1.61\ x\ 10^{15}\quad \text{electron-ion pairs / kg air}$$

في كل كيلوجرام من الهواء الجاف في الظروف المعيارية.

وحيث أن الطاقة اللازمة لإنتاج زوج إلكتروني – أيوني واحـــد في الهواء الجاف هي حوالي 34 إ.ف، تكون كمية الطاقة التي تودع في الهواء لتكوين زوج واحد هي:

$$\varepsilon = 34\ x\ 1.6\ x\ 10^{-19}$$
$$= 5.44\ x\ 10^{-18}\quad \text{Joules}$$

بذلك، تكون الطاقة بالجول المنقولة من الإشعاعات إلـــى كجـــم واحد من الهواء الجاف نتيجة تعرض بمقدار 1 رينتجن هي:

$$E = \varepsilon\ x\ n$$
$$= 5.44\ x\ 10^{-18}\ x\ 1.61\ x\ 10^{15}$$
$$= 0.00876\quad (\text{joules/ kg})$$

وعلى الرغم من أن وحدة الرينتجن مازالت مستخدمة في بعض الأحيان، إلا أن الوحدة ليست كافيـــة لأنهـــا لا تنطبـــق ســـوى علـــى

الإشعاعات السينية وإشعاعات جاما منخفضة الطاقة عند مرورها في الهواء الجاف دون غيره.

ولما كان الهدف الرئيس هو وقاية جسم الإنسان والكائنات الحية الأخرى من الإشعاعات المؤينة، ونظرا لاختلاف امتصاص الطاقة في أنسجة الجسم عنه في الهواء، فإنه يجب إيجاد العلاقة التي تحول التعرض (أي تعرض الهواء الجاف) إلى ما يكافئه من تعرض الأنسجة البشرية. وقد وجد أن الطاقة الممتصة في الجسم البشري عن تعرض مقداره 1 رينتجن هي 0.0096 جول/كجم. لذلك، فإنه عند الحاجة لتحويل التعرض إلى ما يكافئه من جرعة للإنسان يجب أن تؤخذ النسبة (0.00876 : 0.0096) في الحسبان.

4-7 الجرعة الإشعاعية الممتصة

The radiation absorbed dose

نظرا لأن مفهوم التعرض قاصر على الأشعة السينية وإشعاعات جاما منخفضة الطاقة وعلى الهواء الجاف كوسط تنتقل إلية طاقة الإشعاعات، ورغم وجود معامل تحويل من طاقة منقولة للهواء إلى طاقة منقولة للجسم البشري، فقد تم استخدام كمية فيزيائية جديدة تعبر عن انتقال الطاقة من جميع أنواع الإشعاعات وعند جميع طاقاتها، ولجميع أنواع المواد المتعرضة لهذه الإشعاعات. وتعرف الكمية الجديدة باسم الجرعة الإشعاعية الممتصة.

والجرعة الممتصة هي عبارة عن كمية الطاقة التي تنتقل من الإشعاعات المؤينة للجسم المعين. ويستخدم هذا المصطلح لجميع أنواع الإشعاعات والطاقات ولجميع الأجسام والمواد. ولقد استخدمت في أول الأمر وحدة لقياس الجرعة الممتصة تعرف بالراد (Radiation absorbed dose- rad).

1-4-7 الراد الوحدة القديمة لقياس الجرعة الممتصة The rad

يعرف الراد على أنه عبارة عن انتقال كمية من الطاقة مقدارها 100 إرغ لكل جرام من المادة الممتصة، عند مرور الإشعاعات فيهـــا، أي أن:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} / 1 \text{ gm matter} \qquad (7\text{-}8)$$

وحيث أن: 1 إرج = 10^{-7} جول، فإن:

$$1 \text{ rad} = 100 \times 10^{-7} / 10^{-3}$$
$$= 0.01 \text{ joule} / \text{kg}$$

7-4-2 الغراي وحدة الجرعة الممتصة في النظام المعياري

The Gray (Gy)

طبقا لنظام الوحدات المعيارية الدولية (SI) فقد استخدمت وحـــدة جديدة لقياس الجرعة الممتصة هي غراي (Gray - Gy) نسبة إلى العـــالم الفيزيائي غراي الذي كان أول من أوجد الطرق العلمية الدقيقة لقيـــاس الجرعة الممتصة. والغراي هو جرعة من الطاقة الممتصـــة مقـــدارها واحد جول لكل كغم من المادة، أي أن: 1 جراي = 1جول لكل كغم من المادة

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \qquad (7\text{-}9)$$

7-5 التكافؤ بين الرينتجن والراد

تجدر الإشارة إلى أنه في معظم الأحيان يتم تدريج أجهزة قياس الجرعات بوحدات الرينتجن، وذلك بغرض قيـــاس التعـــرض. كـــذلك، يلاحظ أن العديد من جداول الجرعات موضوعة بوحدات الراد. لـــذلك، يجب معرفة علاقات التكافؤ بين هاتين الوحدتين لإجـــراء التحـــويلات اللازمة من قراءة الجهاز بالرينتجن إلى قيمة الجرعة الممتصة بالراد أو الغراي.

وقد ذكرنا أن تعرضا مقداره واحد رينتجن يكافئ جرعة ممتصة مقدارها 0.00876 جول/كغم من الهواء، أو يكافئ 0.0096 جول/كغـــم

من جسم الإنسان. ولما كان الراد هو 0.01 جول/كغم من المادة، فإنـــه يلاحظ أن:

1 رينتجن في الهواء يكافئ 0.876 راد = 0.00876 غراي

1 رينتجن في الإنسان يكافئ 0.96 راد = 0.0096 غراي

وتبين العلاقة الأخيرة أن تعرضا مقداره 1 رينتجن يكافئ بالنسبة لجسم الإنسان 1 راد تقريبا. ولكن يجب أن يؤخـــذ فـــي الحســـبان أن الرينتجن قد حدد أساسا بالنسبة للإشعاعات السينية وإشعاعات جاما، أما الراد فيشمل جميع أنواع الإشعاعات.

7-6 التأثير البيولوجي على جسم الإنسان

Biological effects on the human body

لقد تبين أن التأثير البيولوجي على جسم الإنسان، الناتج عن نفس مقدار الجرعة الممتصة يختلف اختلافا شديدا باختلاف نوع الإشعاعات. فمثلا يلاحظ أن التأثير البيولوجي الناتج عن جرعة مقدارها 1 غـــراي (100 راد) من النيوترونات السريعة أكبر بمقدار عشـــرين مـــرة مـــن التأثير الناتج عن الجرعة نفسها من الأشعة السينية .لذلك، فإنـــه يجـــب معرفة ما يسمى بالتأثير البيولوجي النسبي.

7-6-1 التأثير البيولوجي النسبي (RBE)

هو عبارة عن نسبة الجرعة الممتصة من إشعاعات جاما عنـــد طاقة معينة، إلى الجرعة الممتصة من أي نوع آخر مـــن الإشـــعاعات بحيث يكون التأثير البيولوجي عنهما واحدا في نفس العضو. فعلى سبيل المثال، إذا كان التأثير الناتج عن جرعة مقدارها 0.2 غراي (20 راد) من النيوترونات البطيئة في عضو ما يعادل تماما التأثير النـــاتج عـــن جرعة مقدارها 1.0 غراي (100 راد) من إشعاعات جاما عند الطاقـــة المعينة يكون مقـــدار التـــأثير البيولـــوجي النســـبي Relative biological effectiveness (RBE) هو:

$$RBE = 1/0.2 = 5$$

أي أن التأثير البيولوجي للنيوترونات البطيئة أقوى خمس مرات من تأثير إشعاعات جاما على نفس العضو.

ويختلف التأثير البيولوجي النسبي للإشعاعات باختلاف طاقتها وباختلاف نوع ودرجة التلف البيولوجي الناتج عنها، وكذلك باختلاف نوع النسيج أو العضو. لذلك، فإنه لأغراض الوقاية الإشعاعية استخدمت في الماضي كمية أخرى عرفت باسم معامل النوعية (The quality factor Q) بدلا من التأثير البيولوجي النسبي RBE. إلا إن هذه الكمية الجديدة استبدلت بكمية أحدث منذ عام 1991 م ، تعرف باسم العامل المرجح (أو الوزني) للإشعاع وتتواءم مع المفاهيم الفيزيائية والإحصائية الأساسية.

2-6-7 العامل المرجح للإشعاع W_R

The radiation weighting factor

أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) في نشرتها الأخيرة الصادرة في يناير عام 1991 م، باستخدام مصطلح العامل المرجح (أوالوزني) للإشعاع W_R بدلا من معامل النوعية المستخدم سابقا، حيث ارتبط معامل النوعية بأنه متوسط التأثيرات البيولوجية النسبية على الجسم كله عندما تؤثر الإشعاعات في نقط محددة من كل عضو أو نسيج. أما العامل المرجح للإشعاع فقد أخذ في الحسبان الجرعة الممتصة المتوسطة في كامل العضو أو النسيج. ويبين جدول (7-1) قيم العامل المرجح للإشعاع W_R لبعض الإشعاعات عند طاقات مختلفة.

جدول(7-1)
قيم العامل المرجح للإشعاع W_R للإشعاعات والطاقات المختلفة

نوع الإشعاعات وطاقاتها	قيمة العامل المرجح للإشعاع W_R
الأشعة السينية وأشعة جاما (جميع الطاقات)	1
الإلكترونات والميونات(جميع الطاقات)	1
النيوترونات:	

- بطاقة أقل من 10 ك.إ.ف	5
- بطاقة من 10 حتى 100 ك.إ.ف	10
- بطاقة من 100 حتى 2000 ك.إ.ف	20
- بطاقة من 2 وحتى 20 م.إ.ف	10
- نيوترونات بطاقة أكبر من 20 م.إ.ف	5
البروتونات (بخلاف المرتدة)بطاقة حتى 2م.إ.ف.	10
جسيمات ألفا وشظايا انشطار ونوى ثقيلة	20

7-6-2 الجرعة المكافئة للعضو أو النسيج H_T

The tissue equivalent dose

مع استخدام العامل المرجح للإشعاع W_R بدلا من معامل النوعية Q ، أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية باستخدام مصطلح الجرعة المكافئة للعضو أو النسيج (The equivalent dose in tissue or organ) بدلا من مكافئ الجرعة للإنسان (Dose equivalent man) المستخدم سابقا.

وتحدد الجرعة المكافئة H_T لعضو أو نسيج T من أنسجة الجسم البشري من العلاقة التالية:

$$H_T = \sum_R W_R D_{TR} \qquad (7\text{-}10)$$

حيث: D_{TR} الجرعة الممتصة من النوع المعين من الإشعاعات R في النسيج أو العضو المعين T . ويتم جمع الجرعات المكافئة في النسيج المعين من الإشعاعات المختلفة للحصول على الجرعة المكافئة الكلية في هذا النسيج H_T .

7-6-4 وحدات قياس الجرعة المكافئة

تقاس الجرة المكافئة في عضو أو نسيج بوحدتي رم (rem) في النظام القديم أو بوحدة سيفرت (Sievert Sv) في النظام المعياري الدولي. فعند استخدام النظام المعياري للوحدات (SI) تقاس الجرعة الممتصة بالغراي (Gy)، وعندئذ تقاس الجرعة المكافئة في العضو أو النسيج

بوحدة سيفرت (Sv). أما عند استخدام وحدة راد (rad) التقليدية لقياس الجرعة الممتصة، عندئذ تقاس الجرعة المكافئة بوحدة رم (rem).

وحدة رم Roentgen equivalent man (The rem)

هي الوحدة القديمة لقياس الجرعة المكافئة في نسيج، حيث يعبر عن الجرعة الممتصة بوحدة راد. وتكون الجرعة المكافئة بوحدة رم (rem) هي مجموع حاصل ضرب العامل المرجح للإشعاع في الجرعة الممتصة بوحدة راد طبقا للعلاقة (7−10):

وحدة سيفرت The Sievert (Sv)

هي وحدة قياس الجرعة المكافئة في النظام المعياري الدولي للوحدات، حيث تكون الجرعة المكافئة بوحدة سيفرت عندما يتم التعبير عن الجرعة الممتصة في العلاقة (7−10) بوحدة غراي (Gy).

مثال :

في إحدى السنوات تعرضت رئتا أحد العاملين في مختبر نووي للجرعات التالية: 0.02 غراي (2 راد) نيوترونات حرارية (أي بطاقة أقل من 10 ك.إ.ف)، 0.05 غراي (5 راد) نيوترونات بطاقة 14 م.إ.ف ، 0.8 غراي (80 راد) إشعاعات جاما. احسب الجرعة المكافئة في رئتي هذا العامل عن تلك السنة.

الحل :

بتطبيق العلاقة (7−10) وإيجاد العامل المرجح للإشعاع للأنواع الثلاثة من جدول (7−1)، والتعبير عن الجرعة الممتصة بوحدة غراي نحصل على الجرعة المكافئة بوحدة سيفرت كالآتي:

$$H = \sum W_R H_{TR}$$

$$H = 5 \times 0.02 + 10 \times 0.05 + 1 \times 0.8$$

$$= 0.1 + 0.5 + 0.8$$

$$= 1.4 \quad (Sv)$$

أي أن الجرعة المكافئة في رئتي العامل = 1.4 سيفرت

وعند التعبير عن الجرعة الممتصة بوحـــدة راد نحصـــل علـــى الجرعة المكافئة في الرئتين بوحدة رم كالآتي:

$$H = 5 \times 2 + 10 \times 5 + 1 \times 80$$
$$= 10 + 50 + 80$$
$$= 140 \quad (rem)$$

أي أن الجرعة المكافئة في رئتي العامل = 140 رم.
وباستخدام العلاقة بين الغراي والراد (العلاقة 7–9) يتضح أن العلاقـــة بين السيفرت والرم هي:

1 سيفرت = 100 رم

وهي العلاقة التي أوضحها المثال السابق.

7–6–3 العامل المرجح للنسيج أو العضو W_T

The tissue weighting factor

يعتمد احتمال الإصابة بالتأثيرات العشوائية للإشعاع (كالسرطان أو التأثيرات الوراثية) على نوع العضو أو النسيج المتعرض للإشعاع. فبعض الأعضاء والأنسجة البشرية تتعرض للإصابة السرطانية الناتجة عن الإشعاع أكثر من غيرها عند تساوي مقـــدار الجرعـــة المكافئـــة. ولحساب احتمال إصابة الجسم البشري بهذه التأثيرات فإنه يجب تحديـــد مدى إسهام كل عضو من أعضاء وأنسجة الجسم في هذا الاحتمال عنـــد تساوي الجرعات في هذه الأعضاء. ولعمـــل ذلـــك فإنـــه يجـــب وزن الجرعات المكافئة للأنسجة والأعضاء البشرية بمعامل خاص يطلق عليه اسم العامل المرجح للنسيج أو العضو أو العامل المرجح للنســـيج The tissue weighting factor W_T . ويمثل هذا العامل الإسهام النسبي للنســـيج أو العضو (أي عامل النسيج المرجح) في الضرر الإجمالي للجسم، مـــن بين التأثيرات الناجمة عن تشعيع كامل الجسم تشعيعا متجانسا. بمعنـــى آخر، فإنه عند تشعيع الجسم البشري بشكل متجانس بالإشـــعاع يكـــون العامل المرجح للنسيج أو العضو هو نسبة إسهام هذا العضو في احتمال

الإصابة بالتأثير العشوائي. ويبين جدول (7–2) قيم العوامل المرجحة للأنسجة المختلفة للجسم البشري.

7–6–3 الجرعة الفعالة E

The effective dose

أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية باستخدام مصطلح الجرعة الفعالة E بدلا من المصطلح المتداول قبله وهو مكافئ الجرعة الفعالة. وترتبط الجرعة الفعالة بالتأثيرات العشوائية على كامل الجسم البشري بعد وزن الجرعات المكافئة للأعضاء، طبقا لإسهامها في الضرر العشوائي على كامل الجسم، أي أن الجرعة الفعالة هي مجموع حاصل ضرب الجرعة المكافئة لكل نسيج أو عضو في قيمة العامل المرجح لهذا النسيج أو العضو طبقا للعلاقة التالية:

$$E = \sum_{T} W_T H_T \qquad (7\text{-}11)$$

حيث: W_T هو العامل المرجح للنسيج T ، H_T هي الجرعة المكافئة في النسيج T ، ويتم جمع إسهامات جميع أنسجة وأعضاء الجسم البشري.

جدول(7–2): قيم العوامل المرجحة W_T لأعضاء الجسم البشري

العضو أو النسيج	قيمة المعامل المرجح W_T
الغدد التناسلية	0.20
النخاع العظمي	0.12
القولون	0.12
الرئتين	0.12
المعدة	0.12
المثانة	0.05
الكبد	0.05
الإثنى عشر	0.05
الغدد الدرقية	0.05
الصدر (الثدي)	0.05
الجلد	0.01
سطح العظام	0.01

باقي الأعضاء	0.05
كامل الجسم	1.00

وحدات قياس الجرعة الفعالة

تقاس الجرعة الفعالة E بنفس الوحدات المستخدمة لقياس الجرعة المكافئة، وهي السيفرت في النظام المعياري الدولي والرم فــي نظــام الوحدات القديمة.

مثال:

تعرضت أنسجة وأعضاء أحد فنيي المختبرات الطبية، التي يتم فيها تداول المواد المشعة، خلال عام بسبب اندخال المواد المشعة وبسبب التعرض الخارجي إلى الجرعات التالية: 150 ميللي رم (1.5 ميللي سيفرت) للرئتين، 500 ميللي رم (5 ميللي سيفرت) للمعدة، 100 ميللي رم (1 ميللي سيفرت) للاثنى عشر، 250 ميللي رم (2.5 ميللي سيفرت) للقولون، 50 ميللي رم (0.5 ميللي سيفرت) للغدد التناسلية. احسب الجرعة الفعالة التي حصل عليها هذا الفني بالميللي سيفرت والميللي رم.

الحل:

باستخدام العلاقة (7−11) والتعويض عن الجرعة المكافئة H_T للأعضاء والأنسجة بوحدات سيفرت أو أجزائه، وبإيجاد قيم العوامل المرجحة W_T للأنسجة والأعضاء من جدول (7−2) تكون الجرعة الفعالة بالسيفرت أو أجزائه هي:

$$E = \sum_{T} W_T H_T$$

$$= 0.12 \text{ x}150 + 0.12 \text{ x } 5 + 0.05 \text{ x } 1 + 0.12 \text{ x } 2.5 + 0.20 \text{ x } 0.5$$

$$= 0.18 + 0.60 + 0.05 + 0.30 + 0.10$$

$$= 1.23 \quad \text{m Sv}$$

أي أن الجرعة الفعالة للجسم كله هي 1.23 ميللي سيفرت.

ولحساب المطلوب بالميللي رم تستخدم وحدة ميللي رم للتعبير عن الجرعة المكافئة H_T وتكون الجرعة الفعالة هي:

$$\mathbf{E} = 0.12\text{x}150 + 0.12\text{x}500 + 0.05\text{x}100 + 0.12\text{x}250 + 0.20\text{x}50$$

$$= 18 + 60 + 5 + 30 + 10$$

$$= 123 \text{ mrem}$$

أي أن الجرعة الفعالة للجسم كله هي 123 ميللي رم.

والجرعة الفعالة هي الجرعة التي يجري على أساسها حساب المخاطر العشوائية واحتمالاتها .

وتجدر الإشارة إلى أن هناك كمية أخرى تستخدم للتعبير عن الجرعة الفعالة عندما يكون مصدر التعرض مصدرا داخليا، أي أن التعرض ينتج عن اندخال المادة المشعة إلى داخل جسم الإنسان، وتصبح هذه المادة ملازمة له. ويطلق على هذا المصطلح اسم "**الجرعة الفعالة الملازمة** " **(The committed effective dose)** . ومن الأمثلة على الظروف التي تؤدي إلى تلازم الجرعة الفعالة تلك المواد المشعة التي تتسرب للبيئة من الأنشطة النووية المختلفة أو النويدات المشعة التي انطلقت للبيئة من التفجيرات النووية واستقرت على سطح الأرض وأصبحت مقدرة على الإنسان وملازمة له.

وتقاس الجرعة الفعالة الملازمة بنفس وحدات قياس الجرعة الفعالة، أي بالسيفرت في النظام المعياري العالمي أو بالرم في النظام القديم.

4-6-7 الجرعة الفعالة الجماعية E_C

The collective effective dose

هي عبارة عن مجموع الجرعات الفعالة التي تودع في مجموعة بشرية محددة. وعند تساوي متوسط الجرعة الفعالة التي تودع في جميع أفراد المجموعة تكون الجرعة الفعالة الجماعية E_C هي عبارة عن حاصل ضرب متوسط الجرعة الفعالة للفرد E في عدد الأفراد المتعرضين، أي أن:

$$E_C = E \times n$$

حيث n عدد الأفراد. وتقاس الجرعة الجماعية بوحدة فرد. سيفرت (Man.Sievert).

7-7 معدل الجرعة The dose rate $D^{\bullet}$

تعبر وحدات الغراي والسيفرت (أو الراد والرم)، بالترتيب، عن مقدار الجرعة الممتصة والجرعة المكافئة أو الفعالة التي حصل عليها عضو أو شخص ما خلال مدة زمنية معينة t . ولتقدير قيمة الجرعة التي يتعرض إليها الشخص خلال زمن معين فإنه يجب معرفة ما يسمى بمعدل الجرعة. ومعدل الجرعة $D^{\bullet}$ في مكان ما هو قيمة الجرعة التي يحصل عليها العضو أو الإنسان في وحدة الزمن، عند وجوده في هذا المكان، أي أن:

$$D = D^{\bullet} \times t \qquad (7\text{-}13)$$

مثال:

إذا كانت الجرعة الفعالة المسموح بها في الأسبوع هي 0.4 ميللي سيفرت. فاحسب الزمن الذي يسمح خلاله لشخص ما بالوجود داخل مختبر في الأسبوع إذا كان معدل الجرعة الفعالة داخل هذا المختبر هو 100 ميكروسيفرت/ساعة.

الحل:

$$D = D^{\bullet} \times t$$

.: الزمن المسموح به لوجود الشخص داخل المختبر خلال الأسبوع كله هو:

$$t = D / D^{\bullet}$$

$$= 0.4 \times 10^{-3} / 100 \times 10^{-6}$$

$$= 4 \quad \text{hours}$$

7-8 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- عرف كلا من كثافة تدفق الجسيمات وكثافة تدفق الطاقة، وما هي وحدات قياسهما؟

2- عرف التعرض، وما هي وحدات قياسه؟.

3- لماذا لا تعتبر معرفة التعرض كافية لأغراض الوقاية الإشعاعية؟

4- ما هو الغراي؟، وكيف يرتبط بالراد؟

5- ماذا تعني الجرعة المكافئة؟، وما هو التأثير البيولوجي النسبي، والعامل المرجح للإشعاع والعامل المرجح للنسيج ؟

6- عرف كل من الجرعة المكافئة والجرعة الفعالة ومعدل الجرعة والجرعة الفعالة الجماعية.

7- ما هي وحدات قياس الجرعة المكافئة والفعالة؟

8- احسب تدفق النيوترونات الناتج عن مصدر نيوترونى يصدر 3×10^{10} نيوترون/ ثانية، وذلك على مسافات 0.3 م ، 1 م ، 10م.

9- مصدر كوبلت 6 يشع إشعاعات جاما، فإذا علمت أن شدة المصدر تبلغ 6000 كوري، احسب كثافة تدفق إشعاعات جاما على مسافة 30 سم ، 5 أمتار من مركز المصدر.
احسب كثافة تدفق الطاقة على المسافة نفسها.

10- احسب القيم التالية بالوحدات الدولية المعيارية:
50 ميكروراد ، 200 ميللي راد ، 5 راد ،
3 ميكرورم ، 0.7 ميللي رم ، 2 رم

11- في أحد المختبرات النووية وضع فنيو الوقاية المعدلات التالية للتعرض:
نيوترونات بطاقة 1-2 م.إ.ف، . 2 ميللي راد/ساعة
نيوترونات بطيئة بواقع 50 ميكررو راد/ساعة

إشعاعات جاما بواقع 4 ميللي رينتجن/ساعة
احسب الجرعة المكافئة بالسيفرت التي تتعرض لها أنسجة عامل مكث في المختبر سبع ساعات.

12- في أحد المختبرات الملوثة بمادة الراديوم المشع كانت قــراءات أجهزة قياس الجرعات كالتالي:
جسيمات بيتا 0.5 ميللي راد/ساعة
إشعاعات جاما 0.16 ميكرورينتجن/دقيقة .
احسب الجرعة المكافئة بالسيفرت لرئتي عامل مكث في هذا المختبر ثلاث ساعات، بفرض أنه لم يحدث له تلوث داخلي ولم يقترب من الأسطح الملوثة.

13- إذا كانت الجرعة القصوى المسموح بها في السنة هي 20 ميللي سيفرت، وكانت قراءة الخلفية الإشعاعية في مختبر ما عبارة عن 50 ميكروراد/ساعة لإشعاعات جاما، 5 ميكروراد/ساعة للنيوترونات البطيئة، فما هي المدة القصوى المسموح بالمكوث خلالها داخل المختبر يوميا (اعتبر أن السنة 250 يوم عمل).

14- إذا علمت أن الجرعة الفعالة السنوية المتوسـطة الناتجـة عـن تعرض كافة البشر لإشعاعات جاما المنبعثة مـن الأرض هـي 0.46 ميللي سيفرت. احسب الجرعة الفعالة الجماعيـة لسـكان الكرة الأرضية الناتجة عن هذا النوع من التعرض الطبيعـي إذا علمت أن تعداد سكان العالم 6 آلاف مليون نسمة.